

2.9. ИСТОРИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ СОЛНЦА

д.ф.-м.н. Л. А. Акимов, И. Л. Белкина, Н. П. Дятел, Г. П. Марченко

Введение

Становление солнечной тематики в исследованиях обсерватории Харьковского университета связано с именами известных ученых. Это проф. Б. П. Герасимович, его аспирантка П. Г. Пархоменко и доктор физ.-мат. наук И. М. Гордон. Широкой популярностью в предвоенное время пользовалась первая в СССР монография Б. Г. Герасимовича «Физика Солнца», изданная в Харькове в 1933 г. на украинском языке, а затем переизданная в 1935 г. на русском языке. В монографии были широко представлены основные данные о Солнце, наблюдательные материалы о верхних и нижних слоях солнечной фотосферы и хромосферы, рассмотрены вопросы, связанные с методами астрофизических наблюдений Солнца. На основе общей теории переноса излучения и квантовой теории в ней изложены методы и результаты определения физических характеристик солнечной атмосферы. Другие разделы монографии Б. П. Герасимовича посвящены анализу механизмов и проявлений солнечно-земных связей, теории магнитных бурь, механике и физике корпускулярных потоков от Солнца. Нашли свое отражение также и результаты исследования периодичности солнечной деятельности, переменности солнечного вращения. Затронуты вопросы возможной переменности радиуса Солнца и солнечной постоянной.

П. Г. Пархоменко работала в нашей обсерватории с 1914 по 1939 г.г. Она известна своими теоретическими работами по переносу излучения в атмосфере Солнца, выполнила важную работу по нахождению коэффициентов поглощения солнечной атмосферы в разных длинах волн (Пархоменко, 1931, 1932).

И. М. Гордон работал старшим научным сотрудником Харьковской астрономической обсерватории в 1944 – 1946 г.г. и доцентом кафедры астрономии ХГУ в 1946 – 1949 г.г. В работе (Гордон, 1954) было впервые высказано предположение о том, что хромосферные вспышки (в то время их чаще называли «хромосферными извержениями») обуславливаются процессом ускорения корональных электронов в магнитном поле пятен до приобретения ими релятивистских скоростей и дальнейшего излучения этими электронами в магнитном поле пятна радиации во всем спектре. Сделанные И. М. Гордоном расчеты показали, что пучок электронов размером 5×10^9 см с концентрацией 250 см^{-3} , имеющих энергию 10^9 эв при напряженности магнитного поля в 50 гс, даст согласующееся с наблюдениями рентгеновское излучение ($\lambda \approx 1 \text{ нм}$). Эмиссия в хромосфере может быть следствием воздействия на нее корональных корпускул и квантов. Эта теоретическая работа получила в дальнейшем наблюдательные подтверждения.

Далее в отдельных разделах мы остановимся на основных направлениях работ по исследованию Солнца, которые проводились в астрономической обсерватории Харьковского университета, и отметим наиболее значительные результаты, полученные при их выполнении.

Наблюдения солнечной активности

Регулярные наблюдения различных проявлений солнечной активности в Харьковской обсерватории были начаты еще в 1893 г. проф. Г. В. Левицким и И. И. Сикорой. С 1893 по 1900 г. производились определения чисел Вольфа, положения пятен и протуберанцев. (Крисенко, 1950). В 1931 году наблюдения были возобновлены, и с 1933 г. Харьковская обсерватория начала принимать участие во всесоюзной Службе Солнца (СС). В 1935 году был введен в строй первый в Советском Союзе спектрогелиоскоп – спектрогелиограф (Барабашов и др., 1935). Инициатором и активным участником его создания был Н. П. Барабашов. Оптические и механические части прибора были изготовлены при участии известного ленинградского оптика Н. Г. Пономарева в мастерских обсерватории и Института метрологии. Первыми наблюдателями на новом инструменте в линии H_{α} водорода стали

Л. И. Крисенко и Б. Е. Семейкин. С 1 мая 1935 г. Астрономическая обсерватория ХГУ приступила к систематическим наблюдениям на новом инструменте по программам международной СС (Барабашев и др., 1935). Перерыв в наблюдениях был сделан только на время оккупации Харькова, но уже в 1944 году Л. И. Крисенко возобновила регулярные наблюдения солнечных пятен и флоккулов.

Спектрогелиоскоп – спектрогелиограф до настоящего времени является одним из самых универсальных инструментов для проведения работ по программам Службы Солнца. Его конструкция дает возможность вести практически непрерывные наблюдения за хромосферой Солнца как в центре линии H_{α} , так и в ее крыльях и получать изображения солнечного диска в любой фраунгоферовой линии спектра и в участках непрерывного спектра. Смещение в крылья линии H_{α} осуществляется с помощью *line – shifter* в течение нескольких секунд, поэтому измерения ширины линии с точностью до минуты относятся к одному моменту времени. Такие наблюдения в крыльях линии H_{α} дают возможность измерять лучевые скорости движущихся масс вещества, определять точное время начала активизаций стационарных образований и эруптивных процессов. При этом наблюдения не ограничиваются линией H_{α} , но могут производиться в любых линиях ближней ультрафиолетовой, видимой и ближней инфракрасной областей солнечного спектра. Первые изображения Солнца в линии H и K Call в Харьковской обсерватории были получены Л. И. Крисенко в 1950 г. В том же году Л. И. Кассель сконструировал и изготовил специальный гидромотор для спектрогелиографа, который заменил применявшиеся ранее электрические моторы и устранил зубчатые колеса передач. Благодаря этому качество спектрогелиограмм значительно улучшилось. Регулярные наблюдения кальциевых флоккулов были начаты после реконструкции инструмента при подготовке к работам по программам Международного Геофизического Года (МГГ, 1957–1958 г.г.). В дальнейшем существенным прогрессом в наблюдениях в линии K_{232} Call послужило введение в строй фотоэлектрического прибора для настройки центра линии на щель, который сконструировал и изготовил Л. А. Акимов в 1964 году.

В 1973 году были начаты также регулярные кинематографические наблюдения на хромосферно-фотосферном телескопе АФР-2 с интерференционно-поляризационным фильтром ИПФ-4 в линии H_{α} . Инструмент был установлен на территории Чугуевской наблюдательной станции.

Программа МГГ была приурочена к годам максимальной активности в солнечном цикле №19. Успешная реализация программы МГГ послужила стимулом для проведения дальнейших международных комплексных программ исследования Солнца в различные периоды циклов: МГСС, ГСМ, Flare 22, ГСС... ИНУ. На решение отдельных проблем физики Солнца были направлены проведенные в разные годы наблюдательные кооперативные программы, в которых принимали участие солнечные обсерватории СССР и других социалистических стран – программы КАПГ (Комиссии академий наук социалистических стран по комплексной проблеме «Планетарные геофизические исследования»).

Астрономическая обсерватория Харьковского университета, являясь одной из станций международной сети Службы Солнца (СС) (№34501), принимала участие в проведении всех международных программ. В наблюдательных программах в разные годы участвовали такие научные сотрудники обсерватории: Л. И. Крисенко (руководитель СС до 1962 г.), В. А. Езерская (руководитель СС в 1962–1964 г.г.), Р. М. Чиркова, Н. П. Дятел (руководитель СС с 1964 г.), И. Л. Белкина (руководитель СС с 1996 г.), Т. П. Бушуева, Г. П. Марченко, Л. А. Цымбалюк.

Особое место в работе Харьковской СС занимали оперативные программы наблюдений солнечных вспышек и других геоэффективных процессов – программы академика А. Б. Северного. Программы обычно объявлялись во время пилотируемых космических полетов, результаты их использовались для прогнозов радиационной безопасности космонавтов. Во время программ Северного необходимо было проводить наблюдения весь световой день, оперативно обрабатывать полученные спектрогелиограммы и фотогелиограммы, определять гелиографические положения, баллы, площади и другие характеристики активных явлений. К концу дня все полученные данные кодировались и отправлялись телетайпом в центр прогнозирования радиационной безопасности (ИПГ, г. Москва). Успешное решение таких задач было бы невозможно без помощи лаборантов СС, обязанности которых в разные годы выполняли А. А. Макаровская, Л. Н. Мартыненко, О. И. Романенко, М. А. Хазан.

Новый этап в наблюдательных работах по солнечной активности был связан с созданием в нашей обсерватории универсального фотометра на основе охлаждаемой ПЗС-линейки. Прибор разработал и изготовил В. В. Корохин для наблюдений Луны и планет в

1989 г. С 1992 г. началось регулярное применение фотометра на спектрогелиографе для получения монохроматических цифровых изображений Солнца в линиях H_{α} , K_3 Call, а также в инфракрасной линии гелия $\lambda = 1083$ нм. Проведенные исследования оптических характеристик ПЗС-фотоприемника при работе в квазимонохроматическом режиме в видимой и ближней инфракрасной области выявили отдельные недостатки, связанные с конструктивными особенностями этого приемника. Были разработаны алгоритмы и создано программное обеспечение для устранения этих недостатков. С новым фотоприемником появилась возможность автоматизировать патрульные наблюдения, используя регистрацию изображений примерно каждые 5 минут. Использование цифровых изображений повысило точность определения гелиографических координат активных процессов, позволило быстро и точно определять их площади и интенсивности, а значит и легко оценивать мощность излучения вспышек в линии H_{α} , определяющую энергетику вспышки во всем диапазоне частот (Белкина и др., 1996). Созданное С. А. Белецким (2002) программное обеспечение позволило записывать изображения в цифровые файлы 512 x 600 пикселей в международном формате fits, повышать пространственное разрешение изображений, устранять потемнение изображений от центра к краю для выделения деталей вблизи солнечного лимба, определять координаты необходимых деталей. Все это наблюдатель может делать оперативно, непосредственно в процессе патруля. Таким образом, использование цифровых изображений Солнца в разных линиях позволило проводить патруль солнечной активности на современном техническом уровне. На рис. 2.9.1 приведены примеры изображений, полученных на АФР-2 с ИПФ-4 и на спектрогелиографе Харьковской обсерватории с помощью одномерного ПЗС-фотометра.

Дальнейшее совершенствование наблюдений Солнца направлено на исследование возможностей использования матричных ПЗС-фотоприемников для одновременного получения изображений Солнца в избранных линиях и в их окрестностях (Korokhin et al., 1999). Работы в этом направлении в НИИ астрономии ХНУ продолжаются до настоящего времени.

Необходимо отметить, что данные, полученные во время патрульных наблюдений солнечной активности, ежемесячно передаются в Мировые Центры Данных (МЦД-А Боулдер, Колорадо, США, МЦД-Б, Москва, Россия) и публикуются в международных журналах по солнечной активности: «Solar-Geophysical Data» и «Quarterly Bulletin on Solar activity». В 2000 г. в нашей обсерватории был создан Интернет-сайт KHASSM <http://www.cyteg.com/khassm/>, на котором регулярно выставляются изображения Солнца, получаемые в линиях H_{α} , K_3 Call, HeI.

Данные станции наблюдений НИИ астрономии ХНУ, полученные при проведении патрульных наблюдений солнечной активности, вместе с данными других обсерваторий используются многими исследователями для изучения солнечной цикличности, прогнозов солнечной активности и космической погоды.

Г. П. Марченко и Ю. И. Великодский (2002) создали сайт «Космическая погода» <http://sw.astron.kharkov.ua/>, на котором в режиме реального времени представляются оперативные данные по солнечной активности и состоянию околоземного космического пространства. Изображения в УФ и рентгеновской области спектра, временной ход потока излучения в диапазоне 0,1 – 0,8 нм, потока протонов на орбите Земли, текущие значения индекса геомагнитной возмущенности (K_p индекса) автоматически обновляются по данным со спутников SOHO, Yohkoh и др. Сайт «Космическая погода» пользуется большим спросом у пользователей Интернета, особенно у русскоязычных. Существует и англоязычная версия этого сайта.

Данные наблюдений отдельных явлений на Солнце были использованы для научных исследований. Ниже мы приводим некоторые наиболее значимые результаты исследований солнечной активности, полученные на собственном наблюдательном материале.

1. В результате изучения мощной вспышки балла 4в по фотогелиограммам, полученным на телескопе АФР-2 4 июля 1974 года в линии H_{α} , Белкина и др. (1977) построили световые кривые временного развития отдельных узлов мощной вспышки, определили полную энергию, выделенную вспышкой, и ее геофизические последствия.

2. Для понимания механизмов возникновения больших геоэффективных вспышек и местоположения источников их энерговыделения важно было установить, совпадают ли по своему пространственному расположению ядра вспышечного излучения в хромосфере с ядрами белого свечения этих вспышек на уровне фотосферы. Н. П. Дятел совместно с А. Н. Бабиным (КрАО) и М. А. Лившицем (ИЗМИРАН) изучили фотогелиограммы в линии H_{α} , полу-

ченные в Харьковской обсерватории и в КрАО во время развития вспышки 04.07.74 г., а также фотосферные изображения ядер белой эмиссии этой вспышки, полученные в обсерватории Дебрецен (Венгрия). Исследована связь излучения H_{α} -вспышки со свечением ядер непрерывного излучения этой вспышки, доказано близкое пространственное совпадение ядер непрерывной и H_{α} -эмиссии. Показано, что хромосферная вспышка связана с процессами в корональных петлях на высотах меньших 7000 км (Babin et al., 1985).

3. Т. П. Бушуевой изучены временные изменения асимметрии контура линии H_{α} во вспышках. Полученный ею результат об отсутствии преобладания красной или синей асимметрии в исследованных вспышках, о различной асимметрии разных деталей даже в одной и той же вспышке (Бушуева, 1983) был существенным в то время, поскольку свидетельствовал в пользу петельного строения вспышек.

4. В рамках программы КАПГ «Крупномасштабные поля и рождение активных областей» Т. П. Бушуева и Г. П. Марченко исследовали особенности развития группы пятен и хромосферных флоккулов в линиях H_{α} и K_{232} Call активной области СД №135 в июне 1984 г. Показано, что эта область возникла вблизи устойчивой границы фонового поля, не изменявшейся с предыдущего оборота. Рождение активной области не изменило эту границу, которая оставалась почти той же и в следующем обороте, несмотря на мощный выход нового магнитного потока и сопровождавшие его активные процессы в хромосфере Солнца (Бушуева и Марченко, 1986).

5. По ПЗС-изображениям, полученным в период 1995 – 1999 г.г. в синем и красном крыльях ($\pm 0,05$ нм) линии $HeI \lambda 1083$ нм, сотрудники НИИ астрономии определили средние интенсивности площадок экваториальных корональных дыр и униполярных невозмущенных участков хромосферы, по которым были оценены средние доплеровские смещения линии гелия. Для 105 площадок в корональных дырах получено $\Delta\lambda = -0,0032$ нм, а для площадок в невозмущенной хромосфере – $\Delta\lambda = -0,0012$ нм ($\sigma = 0,0002$). Статистически значимое различие между этими данными служит доводом в пользу того факта, что солнечный ветер из корональных дыр начинает ускоряться с хромосферных высот (Белкина и др., 2000). Учитывая, что в дырах есть элементы тонкой структуры с радиальными потоковыми скоростями ≈ 8 км/с, получено, что такие элементы занимают примерно 10% поверхности КД. Отмечена тенденция увеличения $\Delta\lambda$ вблизи максимума солнечной активности.

6. В результате обработки серии из 18 ПЗС-изображений Солнца в линии $HeI \lambda 1083$ нм, полученной 27 августа 1999 г. во время развития вспышки балла 2N/M5.5, Белкина и др. (2002) нашли, что эта вспышка в линии гелия проявилась только в поглощении. Авторы обнаружили, что изменение глубины инфракрасной гелиевой линии произошло еще до начала вспышки в линии H_{α} . Обнаружено, что наиболее существенные изменения глубины гелиевой линии происходили в участках активной области, расположенных вблизи линий раздела полярностей продольной составляющей фотосферного магнитного поля. Сопоставление гелиевых изображений с изображениями в мягком рентгене, полученными с КА «Yohkoh», выявило, что области повышенного гелиевого излучения располагаются в основном под вершинами или в основаниях корональных петель. Показано, что определяющую роль в возбуждении гелия во время вспышки играет корональное излучение.

Наблюдение солнечных затмений экспедициями АО ХГУ

Полные солнечные затмения позволяют более надежно изучать те слои атмосферы Солнца, наблюдению которых при внезатменных исследованиях препятствует рассеянный свет яркой фотосферы. В нашей Астрономической обсерватории всегда уделяли большое внимание наблюдению солнечных затмений. Харьковские астрономы принимали участие в наблюдениях полных затмений 1914, 1936, 1945, 1952, 1954, 1968, 1972, 1981, 1990 и 2006 г.г. Из них только в 1945 и 1990 годах наблюдения не состоялись из-за плохой погоды. Остальные экспедиции обсерватории успешно выполнили свои программы.

Природа отводит астрономам несколько минут для наблюдений солнечной короны и считанные секунды для наблюдения хромосферы. Поэтому участники экспедиций заранее планируют предстоящие работы и тщательно готовятся к ним. Кульминацией полных солнечных затмений является внезапно вспыхивающая корона. Вид сияющей короны с далеко простирающимися лучами производит большое впечатление. Однако далеко не всем наблюдателям из-за сверхплотного графика работы удастся взглянуть на корону в небе.

Первые экспедиции уделяли наибольшее внимание работам по изучению солнечной короны. В их число входят измерения яркости внутренней и внешней короны, поляризации, выявление структурных особенностей в короне и их движений, получение линейчатого и непрерывного спектров, радионаблюдений и др.

Впервые сотрудники астрономической обсерватории Харьковского университета снарядили экспедицию для наблюдения затмения 21 августа 1914 г. Экспедиция располагалась вблизи г. Геническа на Азовском море. В ее состав входили такие видные ученые, как директор обсерватории Л. О. Струве, сотрудники Б. А. Герасимович, Н. Н. Евдокимов, О. Л. Струве и студент университета И. А. Божко. Они получили снимки внутренней и внешней короны (рис. 2.9.2.). Были определены моменты контактов затмений.

Полное солнечное затмение 19 июня 1936 г. было примечательно тем, что происходило в чрезвычайно благоприятных условиях для наблюдений в Советском Союзе. Полоса полной фазы затмения проходила от Северного Кавказа до Японского моря. Большая протяженность полосы, удобные часы наблюдений, летний период, возможность выборов пунктов с благоприятными метеорологическими условиями – все это способствовало успешному проведению наблюдений. Была создана специальная комиссия АН СССР по подготовке и проведению наблюдений затмения. В эту комиссию вошли представители от многих астрономических обсерваторий и других научных учреждений. Председателем комиссии назначили проф. Б. П. Герасимовича, который в то время уже был директором Пулковской обсерватории. Впервые была разработана единая программа наблюдений, которую выполняли 14 экспедиций разных обсерваторий. Одной из важных задач было исследование изменений в короне на протяжении времени 2 часа 13 минут, за которое лунная тень пробегает территорию от западной границы полосы до восточной. Для решения этой задачи Ленинградский астрономический институт изготовил 7 стандартных коронографов с фокусным расстоянием 5 м и диаметром 110 мм. Один из этих коронографов получила АО ХГУ.

Харьковская экспедиция в составе начальника экспедиции проф. Н. П. Барабашова, проф. Н. Н. Евдокимова, научных сотрудников Б. С. Семейкина, В. А. Михайлова, аспирантов В. Х. Плужникова, А. И. Гарковенкова, В. Д. Фурдыло была направлена в район станции Белореченская Краснодарского края. В задачи экспедиции входили фотометрические исследования внутренней и средней короны в инфракрасных, зеленых и ультрафиолетовых лучах; фотографирование спектров короны на трехпризменном спектрографе, изготовленном в мастерской обсерватории оптиком М. М. Ивановым; получение снимков на стандартном коронографе для изучения изменений в короне и др. Хотя из-за облачности намеченная программа была выполнена не полностью, но в прорывах между облаками удалось получить хорошие снимки и спектры короны. По этим снимкам были определены распределения яркости в короне в разных спектральных диапазонах и распределение интенсивности в спектре короны в области 803 нм – 325 нм (Барабашов, 1937).

Научные программы экспедиций по наблюдению затмений 25 февраля 1952 г. и 30 июня 1954 г. также включали в себя получение распределения интегральной яркости во внутренней и средней короне, исследование непрерывного спектра короны и отдельных ярких корональных линий. Для уточнения теории движений Луны проводились также и определения моментов контактов. В состав экспедиции 1952 г. входили сотрудники обсерватории В. Х. Плужников (начальник экспедиции), Л. И. Крисенко, В. А. Федорец, Г. Р. Посошков, студенты И. К. Коваль и Ю. Ф. Сенчук. Наблюдали затмение в районе ст. Чиили Кзылординской области Казахской ССР. Экспедиция прошла успешно. На стандартном коронографе получено 8 фотографий короны и протуберанцев. Результаты их обработки опубликованы (Крисенко, 1954, Коваль, 1954, Федорец, 1954).

Экспедиция АО ХГУ по наблюдению затмения 30 июня 1954 г. расположила свое оборудование в п. Кобеляки Полтавской области. В состав экспедиции входили почти все сотрудники обсерватории – директор обсерватории проф. Н. П. Барабашов, зам. директора А. Т. Чекирда, сотрудники Л. И. Крисенко, В. А. Федорец, В. И. Езерский, В. А. Михайлов, К. Н. Кузьменко, Г. Р. Посошков, Л. И. Кассель, аспирант И. К. Коваль и 13 студентов. Руководил экспедицией В. Х. Плужников. Корону фотографировали на стандартном коронографе и на специально изготовленной шестикамерной установке с объективами диаметром 10 см и фокусным расстоянием 50 см. Спектры короны были получены на трехпризменном спектрографе. Результаты наблюдений были представлены в работах (Коваль, 1957, Федорец и др., 1958, Михайлов и др., 1958).

Начиная с затмения 22 сентября 1968 г., основными задачами программ экспедиций

Харьковской астрономической обсерватории по наблюдению полных солнечных затмений стало получение кинематографическим методом спектров фотосферы и хромосферы. Необходимость таких наблюдений была обусловлена тем, что самые внешние слои фотосферы и нижние слои хромосферы были к тому времени недостаточно изучены по внезатменным наблюдениям. Вблизи внутренних контактов затмения, после исчезновения фраунгоферова спектра, хромосфера начинает светиться в отдельных эмиссионных линиях. Поскольку хромосферные серпы очень узкие, то их спектр можно получать с помощью бесщелевого спектрографа. К затмению 1968 г. сотрудником обсерватории Л. А. Акимовым был рассчитан бесщелевой спектрограф, который был изготовлен в мастерской обсерватории механиками Л. В. Павленко и В. Л. Павленко. В подготовке оборудования экспедиции и в наблюдениях активное участие принимал и студент физфака В. А. Кришталь, который впоследствии работал научным сотрудником обсерватории.

В задачи экспедиции по наблюдению затмения 22.09.1968 г. входило проведение кинематографических наблюдений спектра хромосферы в участках вблизи линий $D_3 \text{ HeI}$, D_1 , $D_2 \text{ NaI}$, H и $K \text{ CaII}$ и др. Фотографирование спектров с помощью кинокамеры с частотой 18-20 кадров/с позволяло реализовать разрешение вдоль направления движения Луны ≈ 20 км. Впервые такой метод наблюдений был применен Р. А. Гуляевым [1]. Харьковская экспедиция располагалась вблизи поселка Есиль Целиноградской области (Казахстан). Руководителем экспедиции был Л. А. Акимов. В состав экспедиции входили научные сотрудники обсерватории И. Л. Белкина, В. И. Быстрицкий, Н. П. Дятел, В. И. Гаража, С. Р. Измайлов, механик Л. В. Павленко и 3 студента – В. А. Кришталь, В. А. Васильев и Т. Н. Мандрыка. После окончания университета В. А. Васильев успешно работал в РИ НАН Украины. Его кандидатская диссертация была посвящена модели корональных конденсаций, а наблюдательным материалом для модели послужили корональные конденсации короны 22.09.1968 г. (Быстрицкий и Васильев, 1972). Т. Н. Мандрыка после окончания университета заведует библиотекой обсерватории.

Во время затмения 22.09.1968 г. спектры хромосферы регистрировались с помощью кинокамеры «Конвас-автомат» с частотой от 8 до 16 кадров/сек. Момент и длительность экспозиции каждого снимка фиксировались на шлейфном осциллографе и были определены с точностью до 0,01 сек.

Для абсолютной привязки данных к интенсивности центра диска Солнца во время частных фаз затмения производились фотоэлектрические измерения поверхностной яркости солнечного диска в области спектра около 6500 ангстрем. Эти измерения дали возможность контролировать изменения прозрачности земной атмосферы во время наблюдений. Калибровка от центра Солнца проводилась с помощью дополнительной оптической системы объектив-щель-коллиматор.

Наблюдения прошли достаточно успешно. Хотя конечно и были всякого рода неожиданности, в частности, резко упало напряжение в сети. Лишь наличие надежного стабилизатора предотвратило остановку кинокамеры. Учитывая этот опыт, в последующих экспедициях питание кинокамер осуществлялось от аккумуляторов.

Солнечное затмение 10 июля 1972 г. наблюдалось на Чукотке и запомнилось участникам экспедиции своими трудностями. Но в то же время были получены серии снимков спектра хромосферы и короны прекрасного качества. Описание инструмента, методики наблюдений и стандартизации снимков приведено в работе Акимова и др. (1982). Экспедиция АО ХГУ в составе научных сотрудников обсерватории Л. А. Акимова (начальник экспедиции), И. Л. Белкиной, В. И. Быстрицкого, Н. П. Дятел и механика В. Л. Павленко прибыла со своим оборудованием самолетом из Москвы в г. Анадырь. По ходатайству городских властей порт Анадыря выделил баржу для доставки экспедиций на косу «Русская кошка» в Беринговом проливе. Именно там расположили свое оборудование экспедиции многих обсерваторий СССР. Почти все время, пока члены экспедиции готовились к наблюдениям, на косе стояла холодная и облачная погода. С трудом удалось установить и отладить инструмент. Только в день затмения с утра прояснилось и сразу же стало тепло. При этом тучи комаров облепили оборудование и наблюдателей. Однако с программой наблюдений экспедиция успешно справилась.

Сразу же после окончания наблюдений участникам экспедиции нужно было срочно собрать оборудование и погрузить на баржу. Ледовая обстановка у берега была очень тяжелой – по проливу с большой скоростью плыли льдины (была максимальная высота прилива). Экипажу баржи приходилось делать огромные усилия, чтобы на минуту пристать к

берегу. За это время сотрудникам, стоящим на берегу наготове, нужно было успеть забросить на баржу несколько ящиков с оборудованием. Потом баржа отплывала от берега, чтобы пропустить очередную льдину, и повторялось все сначала. В конце концов, оборудование и люди оказались на барже и к вечеру благополучно прибыли в порт Анадырь. Несмотря на все трудности, экспедиция закончилась благополучно.

Солнечное затмение 31 июля 1981 г., видимое на территории Советского Союза по всей полосе полной фазы, наблюдали многие советские и зарубежные экспедиции. Для выбора подходящего места наблюдений для харьковской экспедиции был командирован М. М. Поспергелис. Он обследовал ряд пунктов с разными климатическими условиями, от г. Камень-на-Оби в Сибири до поселков в Тургайской области в Казахской ССР. Выбранное им место на притоке реки Тургай вблизи пос. Амангельды оказалось очень хорошим как для наблюдений, так и для расположения экспедиции. Экспедицией руководил Л. А. Акимов. Она состояла из сотрудников обсерватории М. М. Поспергелиса, И. Л. Белкиной, Н. П. Дятел, Г. П. Марченко, О. М. Стародубцевой, фотографа Ю. А. Марьина, сотрудника ИРЭ АН УССР Ю. В. Корниенко. В наблюдениях затмения приняли участие также В. И. Беленко (Москва, ГАИШ) и сын начальника экспедиции Алексей, который успешно сфотографировал корону на телескопе с объективом «Таир-33». Программа экспедиции предусматривала: кинематографические наблюдения спектров хромосферы и фотосферы в участках с линиями $D_3\text{ HeI}$, D_1 , $D_2\text{ NaI}$, резонансных дублетов SrII , BaII на дифракционном спектрографе; участков спектра с линиями H_β и H_α на призменном спектрографе; фотографирование короны на цветную обратимую и негативную пленки с помощью МТО-1000 и телескопа с объективом диаметром 75 мм и фокусным расстоянием 75 см. Результаты по наблюдению короны опубликованы в работе (Марченко и Цымбалюк, 1984).

Полное солнечное затмение 29 марта 2006 г. было благоприятным на большей части полосы полной фазы. Началось оно в Южной Америке и закончилось вблизи озера Байкал. Экспедиция НИИ астрономии для наблюдения затмения была отправлена на Горную астрономическую станцию Главной астрономической обсерватории РАН, расположенную вблизи Кисловодска в горах Карачаево-Черкесской автономной республики на высоте 2130 метров. Через эту станцию проходила полоса полной фазы затмения. Бессменным начальником экспедиции был Л. А. Акимов. В ее состав входили сотрудники И. Л. Белкина, Г. М. Марченко, Ю. И. Великодский, студент В. Кажанов и внук руководителя экспедиции, ученик 9-го класса Алексей, который во время затмения успешно провел наблюдения по программе исследования дневного астроклимата. Регистрация спектров хромосферы с линией $D_3\text{ HeI}$ впервые осуществлялась с помощью ПЗС-камеры. Наблюдения проводились вблизи третьего контакта на бесщелевом спектрографе, аналогичном описанному выше. Были также получены изображения короны с помощью цифровой камеры.

Основные результаты, полученные сотрудниками НИИ астрономии ХНУ по наблюдениям спектров хромосферы и фотосферы по материалам затмений 22 сентября 1968 г., 10 июля 1972 г. и 31 июля 1981 г., отражены в последующих разделах.

Структура и эмиссии солнечной хромосферы в линии $D_3\text{ HeI}$ по наблюдениям полных солнечных затмений

Линия $D_3\text{ HeI}$ (587,6 нм) как одна из наиболее интенсивных гелиевых линий, видимых на краю солнечного диска, наряду с инфракрасной линией 10830 нм вызывала особый интерес как у наблюдателей, так и у теоретиков.

Еще в 1935 г. Перепелкин и Мельников [2] впервые указали, что максимум свечения в линии D_3 расположен на высоте около 1300 км. Дальнейшие наблюдения, как во время, так и вне затмений [3,4] в целом подтвердили этот факт, обнаружив максимум излучения хромосферы в линии D_3 на высотах 1150 и 1500 км соответственно. Поскольку на высотах максимума температура хромосферы меньше той, которая необходима для возбуждения атомов гелия электронным ударом, появился ряд работ, объясняющих возбуждение гелия коротковолновым излучением короны, см., например, [1,5,6].

Экспедициями Харьковской обсерватории во время затмений в 1968, 1972, 1981 г.г. на бесщелевом спектрографе было получено большое количество снимков спектра хромосферы в линии D_3 гелия и фотосферы в окрестности этой линии с помощью кинокамеры «Конвас» со сверхвысоким разрешением по высоте (15 – 30 км вдоль направления движения Луны).

Хромосферные серпы для затмений 1968 г. и 1972 г. были профотометрированы в ряде точек солнечного лимба, соответствующих впадинам лунного лимба. Результаты обработки позволили уточнить ранее известные и выявить новые характерные особенности свечения гелия в нижней и средней хромосфере (Белкина и др., 1972, Livshits et al., 1976, Акимов и др., 1998). Оказалось, что положение и величина максимума свечения гелия для невозмущенной хромосферы зависят от широты. В то время как на широтах, больших 20° , основное излучение хромосферы в линии D_3 приходится на высоты 1500 – 1600 км, вблизи экватора максимум свечения наблюдается на высотах, меньших 1000 км. При этом величина максимального свечения экваториальной невозмущенной хромосферы превышает максимальное значение интенсивности хромосферы на широтах 20° – 40° более чем в два раза. Выявлено также наличие двух типов распределения интегральной яркости с высотой, существенно отличающихся градиентами интенсивности: в спокойной хромосфере градиент интенсивности меньше, чем в активных областях.

Другой особенностью свечения гелия в нижней и средней хромосфере, обнаруженной по материалам наблюдения затмений 1968 г. и 1972 г., является то, что наряду с максимумом излучения на высотах 1000 – 1500 км в активных областях и в слабо возмущенной хромосфере на высоте около 250 км, то есть фактически в области температурного минимума, наблюдается дополнительный максимум свечения. Некоторые внезатменные наблюдения также указывали на наличие свечения в нижней хромосфере. Предполагалось, что это явление обусловлено наложением по лучу зрения отдельных неоднородностей, принадлежащих более высоким слоям хромосферы. Поэтому в работах, посвященных механизмам возбуждения атомов гелия в хромосфере коротковолновым корональным излучением с $\lambda < 50,4$ нм, наличие гелиевой эмиссии в области температурного минимума в расчет не принималось. Однако регулярный характер близфотосферного свечения, обнаруженный Л. А. Акимовым, И. Л. Белкиной, Н. П. Дятел по наблюдениям затмений, дает основание считать это свечение реальным фактом. Для окончательного прояснения этого вопроса было решено обработать спектры вспышек затмения 1972 г. и 1981 г. с применением нового метода, дающего возможность получить полную картину свечения гелия в хромосфере в линии D_3 , а не только в отдельных точках солнечного лимба.

В 1992 г. Л. А. Акимовым был сконструирован и изготовлен быстродействующий микрофотометр на базе МФ-2 для фотометрии спектров с записью результатов измерений в память ЭВМ. На нем были измерены снимки, полученные экспедициями 1972 и 1981 года. Программный комплекс для обработки результатов измерений был разработан Белецким (2000).

Новая методика фотометрии спектрограмм солнечных затмений дала возможность получить карты распределения абсолютных значений яркости хромосферы в линии D_3 в зависимости от широты и высоты. Результаты обработки кинематографических наблюдений хромосферных серпов для восточного лимба затмения 1972 г. и западного лимба затмения 1981 г. представлены в работах (Akimov et al., 1999, Акимов и др., 2000, Акимов и др., 2002). Карта для восточного лимба затмения 1972 г., отображающая картину свечения гелия в хромосфере, приведена на рис. 2.9.3. Как хорошо видно из рисунка, свечение наблюдается в обособленных (типа облачных) образованиях, придающих изображению пятнистый характер. Эти образования, имея максимум концентрации вблизи 1400 км, наблюдаются до высот 3 – 4 тыс. км, а их вершины простираются до 6 тыс. км. Характерный размер эмиссионных образований для обоих затмений соответствует размеру супергрануляционной ячейки (20 – 30 тыс. км вдоль лимба). В экваториальной зоне – зоне повышенной эмиссии присутствует свечение вблизи фотосферы с максимумом на высоте 250 км. Оно отделено полосой ослабленного излучения от структур верхнего максимума, приходящегося на высоту 1400 км. Протяженность хромосферы на высоких широтах больше, чем на низких.

На рис. 2.9.4 представлено распределение интегрального излучения хромосферы вдоль широты для затмений 1972 и 1981 г.г., выраженное в абсолютных единицах. Абсолютная привязка осуществлялась по методике, одинаковой для обоих затмений. Обе кривые показывают, что излучение в активных и спокойных широтах различается в два раза. Средняя яркость невозмущенной хромосферы в 1981 г. в два раза выше, чем яркость невозмущенной хромосферы 1972 г. Учитывая, что 1972 г. и 1981 г. отвечают разным стадиям цикла солнечной активности (среднемесячные числа Вольфа 76,5 и 151,3 для 1972 и 1981 г.г. соответственно), можно заключить, что интегральная яркость невозмущенной хромосферы увеличивается от минимума к максимуму солнечной активности.

Как показано в статье Сомова и Козловой [7], интенсивность линии HeI 1083 нм при переходе от минимума к максимуму цикла также увеличивается в два раза. Акимов и др. (2002) показали, что на высотах, больших 2000 км, гелиевое излучение в активных областях становится меньше, чем в спокойных и слабо возмущенных местах солнечного лимба. Излучение на высоте 3000 км в спокойных широтах втрое превышает излучение в активных областях, т.е. наблюдается антикорреляция с интенсивностью излучения короны. Это означает, что хромосфера в активных областях как бы прижата к фотосфере, что можно связать с различием значений и конфигурации магнитных полей в спокойной и слегка возмущенной хромосфере и в активных областях.

На рис. 2.9.5 представлена зависимость интенсивности излучения в линии гелия от высоты, проинтегрированного по всем широтам, для обоих затмений. Интенсивности верхних максимумов для обоих затмений различаются в 2,2 раза, а средняя энергия всей хромосферы – вдвое. Здесь наблюдается корреляция с числом Вольфа. На высотах > 2500 км наблюдается экспоненциальный спад интенсивности для обоих затмений, но с разным градиентом. Градиент изменения яркости после максимума в 4 раза больше для затмения 1981 г., так что на высотах > 3500 км интенсивность эмиссии в 1972 г. несколько выше, чем в 1981 г. То есть протяженность гелиевой хромосферы больше в 1972 г., чем в 1981 г.

Для обоих затмений в усредненной картине уверенно проявляется нижний максимум, расположенный вблизи фотосферы на высотах 200 – 300 км, т. е. в области температурного минимума. Нижний максимум является реальным. В принципе нельзя отрицать, что отдельные близфотосферные структуры могут быть следствием наложения по лучу зрения излучения от более высоко расположенных образований. Однако протяженность по высоте у близфотосферных структур, как правило, меньше, чем у структур верхнего максимума, и они отделены от эмиссии в средней хромосфере полосой ослабленного излучения. Поэтому присутствие нижнего максимума в интегральной характеристике исключает его интерпретацию случайным наложением по лучу зрения структур верхнего максимума. Отношение энергии верхнего к энергии нижнего максимумов равно 5 и 11 для затмений 1972 и 1981 г.г., соответственно. Как показано в работе (Акимов и др., 2002), свечение гелия в области температурного минимума, также как и свечение гелия в средней хромосфере, может быть объяснено радиацией из короны, проникающей до основания хромосферы. Однако для этого требуется рентгеновское излучение с $\lambda < 6$ нм.

В таблице 1 приведены оценки проникновения коронального излучения в хромосферу Солнца для различных длин волн, которые были выбраны из следующих соображений. Квант с $\lambda = 50,4$ нм однократно ионизирует атом гелия; излучение $\lambda = 30,4$ нм (линия Лайман-альфа гелия) является самым интенсивным в области длин волн <50 нм, оно активно участвует в ионизации гелия; фотон с $\lambda = 22,8$ нм соответствует пределу серии Лаймана гелия; в окрестности $\lambda = 9,1$ нм располагается область минимума коронального излучения, а вблизи 1,5 нм – область максимума рентгеновского излучения короны, где проявляется тепловое излучение корональных конденсаций и излучение в линиях FeXVII и OVIII.

Таблица 1

Коэффициенты атомного поглощения и высоты, до которых может проникнуть корональное излучение с разными длинами волн

λ , нм	α_H , см ²	α_{He} , см ²	α_{Σ} , см ²	h, км	h(0.3), км	h(0.1), км
504	$2.42 \cdot 10^{-18}$	$7.60 \cdot 10^{-18}$	$2.88 \cdot 10^{-18}$	2180	1680	1300
304	$2.92 \cdot 10^{-19}$	$2.76 \cdot 10^{-18}$	$5.14 \cdot 10^{-19}$	1440	1200	1020
228	$1.23 \cdot 10^{-19}$	$1.55 \cdot 10^{-18}$	$2.52 \cdot 10^{-19}$	1270	1090	930

8						
9	$7.90 \cdot 10^{-21}$	$2.47 \cdot 10^{-19}$	$2.94 \cdot 10^{-20}$	950	810	640
1						
3	$2.82 \cdot 10^{-22}$	$2.69 \cdot 10^{-20}$	$2.68 \cdot 10^{-21}$	650	520	350
0						
1	$3.50 \cdot 10^{-23}$	$6.73 \cdot 10^{-21}$	$6.38 \cdot 10^{-22}$	470	330	240
5						

При расчетах использовались значения коэффициентов атомного поглощения излучения α , приведенные в [8]. Для водорода $\alpha_H(\text{см}^2) = 7,9 \cdot 10^{-18} \cdot (\lambda/\lambda_1)^3$, где $\lambda_1 = 91,2$ нм. Для атомов гелия за границей его серии Лаймана имеем: $\alpha_{He}(\text{см}^2) = 7,6 \cdot 10^{-18} \cdot (\lambda/\lambda_2)^2$, где $\lambda_2 = 50,4$ нм. Суммарный коэффициент атомного поглощения атмосферы с учетом того, что атомов гелия в 10 раз меньше, чем атомов водорода, будет: $\alpha_\Sigma = 0,91\alpha_H + 0,09\alpha_{He}$. Оптическая глубина, на которую проникнет фотон при движении вдоль радиуса, $\tau = \alpha_\Sigma N(h)$, где $N(h)$ – полное число атомов над фиксированным уровнем h в атмосфере.

Анализируя представленные в таблице результаты, можно сделать вывод, что для излучения с $\lambda = 50,4$ нм основным поглотителем фотонов является водород. Он поглощает в 3 раза больше фотонов, чем гелий. Для длин волн 30,4 и 22,8 нм водород и гелий выступают равноправными поглотителями. Для $\lambda < 10$ нм гелий поглощает большую часть излучения, а на $\lambda = 1,5$ нм гелий поглощает в 20 раз эффективнее, чем водород. В пятом столбце таблицы представлены высоты h , до которых доходит около 40 % излучения короны для однородной модели хромосферы. На этой высоте оптическая толщина для коронального излучения $\tau = \alpha_\Sigma N(h) = 1$. Значения h отсчитываются от основания хромосферы. Следует заметить, что основная масса энергичных фотонов сосредоточена в области от 40 до 20 нм [9]. Эти фотоны формируют верхний максимум излучения в линии D₃. Рентгеновское излучение на этих высотах практически не поглощается.

Известно, что хромосфера весьма неоднородна. Размер неоднородностей меняется в широких пределах – от размера супергранул до тонких трубок диаметром около 40 км. Наличие мелкомасштабных неоднородностей следует, в частности, из измерений соотношения интенсивностей компонентов триплета инфракрасной линии гелия $\lambda 1083\text{нм}$ [7]. Глубина линии мала – около 2 процентов от интенсивности континуума. Для малой оптической толщины поглощающего слоя сумма интенсивностей двух более длинноволновых компонентов триплета, имеющих почти одну и ту же длину волны, в 8 раз больше интенсивности третьего. Однако результаты многочисленных измерений отношений центральных глубин сильного и слабого компонентов для спокойных и возмущенных областей на разных расстояниях от центра диска показали, что по отношению центральных глубин компонентов оптическая толщина сильного компонента меняется от 0,7 до 2,5, что свидетельствует о значительном самопоглощении в линии, соответствующем большой оптической толщине. Противоречие можно устранить, если предположить, что излучение формируется в плотных образованиях, покрывающих малую часть видимой площади хромосферы.

С учетом этого обстоятельства можно рассчитать глубины проникновения коронального излучения при различных значениях фактора заполнения видимой площади излучающими элементами. В двух последних столбцах таблицы 3.1 приведены результаты вычисления глубины проникновения излучения для фактора заполнения 0,3 и 0,1, которые показывают, что в неоднородной хромосфере с такими факторами заполнения площади излучающими элементами рентгеновское излучение проникает в область температурного минимума.

Для спокойного Солнца (Иванов-Холодный и др., 1966) энергия излучения для волн короче 6 нм составляет около 5 процентов от количества энергии за пределом серии Лаймана для гелия [10]. В годы максимума средняя энергия коротковолнового излучения возрастает: для $\lambda < 40$ нм в 1,5-2 раза, $\lambda < 6$ нм – в 5 раз, а для $\lambda < 2$ нм – в 15 раз. Для активных областей с высокотемпературными корональными конденсациями последняя величина может меняться в десятки раз.

Таким образом, проведенные харьковскими солнечниками оценки показали, что рентге-

новское излучение короны с $\lambda < 6$ нм проникает в нижние слои хромосферы, чему способствует весьма неоднородный характер строения хромосферы и возможность прохождения энергичных квантов между сгустками хромосферной плазмы. Наблюдательные данные подтвердили предположение об определяющей роли коронального излучения в появлении нижнего максимума в высотном распределении гелиевой эмиссии. Так, нижний максимум гелиевого излучения проявляется преимущественно в активных областях, его величина, как и интенсивность излучения короны в рентгеновской области спектра, существенно варьирует в зависимости от фазы цикла солнечной активности. Ослабление гелиевого излучения на высотах между верхним и нижним максимумами, Акимов и др. (2003) объяснили дефицитом ионизирующего коронального излучения в области длин волн 6-17 нм.

Исследование яркости фотосферы и факелов на краю солнечного диска. Структурная модель факела

Распределение яркости фотосферы по диску Солнца изучалось многими наблюдателями и измерено с высокой точностью до расстояний ≈ 1500 км от края. Оно хорошо описывается теоретическими моделями. Распределение яркости на самом краю диска можно получить, измеряя временной ход интегральной яркости участка фотосферы, возвышающегося над лунным лимбом, во время полных солнечных затмений. Таким способом были вычислены абсолютные значения поверхностной яркости в зависимости от высоты для различных точек солнечного лимба по сериям снимков спектра вблизи линии D_3 гелия, полученным экспедициями Харьковской астрономической обсерватории в 1968, 1972 и 1981 г.

Среднее распределение поверхностной яркости в невозмущенной фотосфере для каждого затмения было получено путем усреднения кривых поверхностной яркости в 6-8 точках. Эти точки располагались в центре четок Бейли, соответствующих протяженным впадинам на лимбе Луны. Все средние кривые потемнения вблизи лимба показывают небольшое (3-9 %) увеличение яркости на расстоянии 300 – 600 км от края. Хотя измерения проводились только в невозмущенных участках фотосферы на лимбе, градиент яркости вблизи нуля для западных более «активных» лимбов 1968 и 1981 г.г. оказался в 1,4 раза ниже, чем для более «спокойных» восточных лимбов 1972 и 1981 г.г. (Акимов и др., 1990).

Изучено влияние искажающих факторов, которые могли вызвать обнаруженное увеличение яркости фотосферы вблизи лимба при наблюдениях с небольшими телескопами (апертура 10 см). Такими факторами являются небольшие размеры и характер рельефа впадин на лунном лимбе, а также мерцания света от источников с малыми угловыми размерами. В работах Белкиной и др. (1990), Акимова и др. (1992) показано, что размер четок, в которых производилась фотометрия спектров, достаточно велик и искажающие факторы не могут быть причиной уярчения фотосферы вблизи лимба.

По измерениям, выполненным во время затмения 1972 г., Акимов и др. (1982) получили довольно тесную корреляцию яркости фотосферы на лимбе со степенью активности исследуемых областей в хромосфере. Однако измерения и сопоставление яркости с активностью областей на лимбе, проведенные для затмения 1981 г., не обнаружили столь тесной корреляции, хотя активность на лимбе в затмение 1981 г. была существенно выше, чем в затмение 1972 г. Некоторые участки лимба с мощными активными областями при сравнении со спокойными областями не показали увеличения яркости фотосферы, заметно превышающего ошибки измерений. Для объяснения этого факта было выдвинуто предположение, что факелы разной мощности или структуры имеют разный ход яркости по диску и достигают максимального контраста на различных расстояниях от диска.

Однако опубликованные данные, подробный анализ которых проведен Акимовым и др. (1987), представляют весьма разнородную картину. Контраст факелов меняется в широких пределах, достигая наибольшего значения 1,6. У большинства авторов контраст максимален на каком-то расстоянии от центра диска, а на краю наблюдается резкий спад. У других отмечается рост контрастов до самого края. В связи с этим возникла необходимость провести дополнительно исследование хода контрастов факелов по диску, особенно вблизи края, обращая особое внимание на слабые и малозаметные структуры.

Наблюдения фотосферы проводились в зеленой области спектра ($\lambda_{эфф} = 0,54$ мкм) в 28-м эквивалентном фокусе телескопа АЗТ-8 с кольцевой диафрагмой диаметром 50 см и шириной 5 см, установленной перед зеркалом телескопа (Акимов и др., 1987). Для фотографирования использовались высококонтрастные пластинки FO-6 ORWO. Наблюдательный материал был получен с 12 по 30 июня 1984 г. Для обработки были выбраны 9 лучших

снимков с факелами, расположенными как можно ближе к краю. На рис. 2.9.6 представлен один из обработанных снимков среднего качества, интересный тем, что на нем видно большое количество факельных волокон вблизи самого лимба. Этот снимок получен в результате специальной обработки с устранением падения яркости фотосферы к краю.

При фотометрии снимков круглая диафрагма вырезала на Солнце участок около двух квадратных секунд дуги. Измерения проводились для всех факелов, яркость которых превышала яркость невозмущенной фотосферы на 3%. Всего проведено 582 измерения. Средняя кривая контраста факелов по измерениям на снимках с высоким пространственным разрешением свидетельствует о росте контрастов на краю диска.

Для того чтобы проследить эволюцию яркости факельных волокон разной интенсивности при их перемещении по видимому диску Солнца, были обработаны два снимка западного лимба в окрестности активной области. Анализ показал, что все факелы, яркость которых не более чем на 9% превышала яркость фотосферы на утреннем снимке, увеличили свой контраст спустя 10 часов при движении к лимбу. У всех факелов, яркость которых более чем на 18% превышала яркость фотосферы, контраст уменьшился. На рис. 2.9.7 приведены результаты этого исследования. Сплошные векторы характеризуют эволюцию ярких факелов, контраст которых был выше среднего на первом снимке, а пунктирные – слабых. Цифры у векторов – число факелов в группе, по которым проведено усреднение. Мы видим, что контраст слабых факелов, как правило, увеличивается при приближении к лимбу, а ярких уменьшается, если $\cos\theta$ меньше 0,35, где θ – угловое расстояние от центра диска.

Таким образом, предположение о различном поведении контрастов отличающихся по мощности факелов вблизи края подтвердилось. Эти данные позволяют согласовать на первый взгляд противоречивые наблюдения разных авторов.

Явление факела связано с магнитным полем умеренной интенсивности. Умеренной в среднем, поскольку в атмосфере, занятой факелами, могут встречаться объемы, где концентрация поля в несколько раз выше среднего значения, и объемы, лишенные поля. На уровне оптической глубины $\tau = 0,1 - 0,3$ энергия поля сравнима с энергией конвективного движения в гранулах. В этом случае поле является мощным фактором, преобразующим энергию турбулентного и направленного макроскопического потока плазмы в энергию хаотического теплового движения. Направленный поток плазмы сохранит импульс вдоль поля. Движение поперек направления поля будет испытывать вязкое торможение, что приведет к повышению температуры и плотности плазмы у границ поля. Дальнейшая тепловая диффузия приводит к размытию этой конденсации. Однако скорость диффузии вдоль поля выше, чем поперек, что совместно с условием сохранения составляющей макроскопического импульса вдоль поля способствует значительному подъему плазмы в верхние слои атмосферы, если поле направлено вдоль радиуса Солнца.

Такую ситуацию можно промоделировать сдвигом вдоль радиуса Солнца соседних участков фотосферы друг относительно друга на величину $\Delta\tau$ по оптической глубине. При расчетах предполагалось, что структура одномерная и периодическая, d_1 – ширина поднятого элемента, d_2 – ширина опущенного. Для зеленой области функция источника взята в виде $J(\tau) = 0,31 + 0,93\tau - 0,24\tau^2$. А связь между геометрической и оптической глубиной задавалась эмпирическим соотношением $\tau = 0,0045 \exp(-0,0183h)$, где h выражена в километрах.

Результаты расчетов контрастов показали, что при одинаковом сдвиге по глубине контраст слабо зависит от ширины неоднородностей в диапазоне от 25 до 200 км при $d_1 = d_2$. Мощным факелам лучше всего удовлетворяет сдвиг по τ 0,6 – 0,8 при $d_1 = d_2$. Для них максимум контраста наступает при $\cos\theta = 0,2$ и падает до нуля на лимбе. При уменьшении $\Delta\tau$ максимум сдвигается к лимбу, а его величина уменьшается почти пропорционально величине сдвига. При увеличении скважности структуры (увеличение ширины опущенного элемента при неизменной ширине поднятого) контраст уменьшается вдали от лимба, но увеличивается с приближением к лимбу и сдвигается к краю диска (рис. 2.9.8).

Небольшой всплеск яркости и изменение градиента кривых невозмущенной фотосферы вблизи лимба авторы (Акимов и др., 1988) также объяснили в рамках структурной модели факела, предполагая существование структур на краю диска.

Таким образом, предложенная структурная модель факела удовлетворительно описывает наблюдаемое поведение контраста факельных структур. Эта модель не противоречит и измерениям высоты фотосферы по затменным данным, приведенным в работах Акимова и др. (1984, 1993, 1994). В этих работах было обнаружено, что в активных областях, как правило, граница лимба расположена выше, чем в спокойных. Акимов и др. (1994) показали, что если поверхность с одинаковой плотностью в атмосфере Солнца описывается некоторой

средней сферой с отклонениями, распределенными по нормальному закону, то высота лимба неоднородной фотосферы возрастет на величину $\sigma^2/2H$. Здесь σ – среднеквадратичная величина отклонения поверхности от сферы, а H – шкала высот солнечной атмосферы.

Изучение турбулентности в нижней и средней хромосфере по затменным данным

Явление турбулентности солнечной хромосферы частично обусловлено макроскопическими движениями, имеющими основание в конвективной зоне, частично – прохождением упорядоченных волн. В нижней хромосфере, до высот ≈ 1500 км, из-за существенной плотности вещества и переналаживания по лучу зрения, выделение отдельных структурных элементов затруднительно, поэтому для таких высот определяют обычно только среднюю скорость нетепловых движений V_t . Для определения V_t на высотах ≥ 2000 км возможно использование спектральных наблюдений на внезатменных коронографах. На меньших высотах из-за атмосферного замытия определение V_t более надежно по наблюдениям во время затмений. Данные о значениях V_t в хромосфере до 90-х годов прошлого столетия были противоречивы. Одни авторы [11] получили по своим данным резкий рост V_t от значений порядка 3 км/с в основании хромосферы, до 10 км/с на высоте 1500 км. По другим данным [12] турбулентная скорость атомов большинства элементов является низкой и на высоте 2000 км не превышает 5 км/с.

Лэндмэн [13] по спектрам хромосферы, полученным во время затмения, для высот ≈ 1500 км определил разные значения V_t для атомов NaI (≈ 5 км/с) и для ионов тяжелых элементов SrII и BaII (≈ 11 км/с). Следует отметить, что ионы тяжелых элементов являются хорошими индикаторами турбулентности в хромосфере. Так, при температурах, характерных для нижней хромосферы, даже небольшая турбулентная скорость 2 км/с более чем в 2 раза [13] превышает тепловую скорость ионов SrII и в 3 раза превышает тепловую скорость ионов BaII. Если различие нетепловых скоростей атомов NaI и ионов тяжелых элементов являлось бы реальным, то необходимо было бы вводить двухкомпонентные модели хромосферы с разными условиями свечения для нейтральных атомов и ионов.

Для подтверждения или опровержения реальности различия скоростей атомов и ионов тяжелых атомов на высотах порядка 1500 км в солнечной хромосфере во время затмения 31.07.1981 г. экспедиция АО ХНУ провела специальные наблюдения и получила серии бесщелевых спектров хромосферы в линиях резонансных дублетов NaI, SrII с разрешением по высоте порядка 30 км. При исследовании турбулентности тяжелых ионов были использованы также наблюдательные данные других авторов [14] для линий резонансного дублета BaII.

Оригинальный метод определения V_t по линиям резонансного дублета NaI был предложен Г. К. Аймановой и Р. А. Гуляевым [15]. Поскольку самопоглощением в нижней и средней хромосфере пренебрегать нельзя, метод основан на применении кривых роста. Кривые роста представляют собой зависимость интенсивности одной из линий дублета от числа атомов в нижнем состоянии в столбе единичного сечения по лучу зрения (N_i) при разных значениях V_t . Такое же семейство кривых роста при разных значениях V_t вычисляется и для отношения линий дублета в зависимости от N_i . Очевидно, что при правильном выборе V_t оба способа определения N_i должны давать близкие результаты. Формулы для вычисления кривых роста и результаты вычислений для ионов резонансного дублета SrII приведены в работе Белкиной и др. (1989), а для ионов резонансного дублета BaII – в работе Белкиной и др. (1991). Расчеты были проведены с учетом того, что в условиях невозмущенной хромосферы при $T_e < 10^4$ K, $n_e < 10^{12}$ см $^{-3}$ населенность верхних уровней атомов натрия ($3^2P_{1/2,3/2}$ NaI) и ионов стронция и бария ($5^2P_{1/2,3/2}$ SrII, $6^2P_{1/2,3/2}$ BaII) определяется рассеянием фотосферного излучения, которое в частотах линии излучения содержит фраунгоферовы линии. При расчетах N_i по отношению интенсивностей линий дублетов для ионов стронция и бария было принято во внимание, что коротковолновое крыло линии SrII λ 421,6 нм и линия BaII λ 493,4 являются блендированными, поэтому контуры этих линий несимметричны.

На рис. 2.9.9 слева приведены распределения с высотой в хромосфере количества ионов SrII N_i в столбе единичного сечения вдоль луча зрения. Сплошные линии получены по кривым роста для линии 407,8 нм, штриховые – по теоретическому отношению интенсивностей линий резонансного дублета стронция. Аналогично, справа приведены распределения для ионов BaII, где сплошные линии получены по кривым роста для линии 455,4 нм, а штриховые – по отношению интенсивностей линий дублета BaII.

Как показывает рис. 2.9.9, в невозмущенной хромосфере средняя скорость нетепловых движений ионов SrII на высотах 900 – 1200 км оказалась равной около 6 км/с. Это значение

близко к тому, которое было получено ранее для атомов NaI. Для ионов BaII в этом же интервале высот получилось даже меньшее значение $V_t = 3 \text{ км/с}$.

Белкина и др. (1989, 1991) показали, что именно неучтенное другими блендирование одной из линий резонансных дублетов ионов SrII и BaII существенно искажает кривые роста и приводит к большим значениям скорости $V_t \approx 10 \text{ км/с}$. Авторы указанных работ обнаружили также тенденцию к уменьшению средней скорости нетепловых движений атомов NaI и ионов SrII в активных областях по сравнению с невозмущенными. Они объясняют ее тем, что сильные магнитные поля активных областей могут подавлять турбулентные движения.

Таким образом, проведенные в АО ХНУ исследования подтвердили концепцию невысоких турбулентных скоростей атомов и тяжелых ионов в нижней и средней хромосфере и выявили разницу между активными и спокойными областями на Солнце по значениям средней скорости нетепловых движений.

Результаты исследований Солнца в рентгеновском диапазоне

В течение последних десятилетий по настоящее время мониторинг солнечной активности проводится с космических аппаратов (КА) в спектральных диапазонах, которые недоступны для наземных наблюдений из-за поглощения в земной атмосфере, таких как дальний ультрафиолет (EUV) и рентген (X-ray). КА серии GOES практически непрерывно, начиная с середины 70-х годов прошлого столетия, каждые 5 минут регистрируют рентгеновский поток от всего Солнца. Данные наблюдений, в том числе и оперативные, в настоящее время через Интернет доступны всем желающим.

Для исследования циклических изменений солнечной активности необходимы длинные временные ряды данных. Такие данные по излучению Солнца в диапазоне мягкого рентгена 0,1 – 0,4 нм были использованы в нашем НИИ астрономии для создания и исследования новых индексов вспышечной активности Солнца в этом диапазоне (Акимов и др., 2005). Один из этих индексов (XFI) является энергетическим, другой (Nx) – частотным индексом. Это выгодно отличает эти индексы от таких общеизвестных, как числа Вольфа или вспышечный индекс в линии H_α (OFI, индекс Клечека), физический смысл которых не является строго определенным. Индекс XFI с достаточной точностью представляет собой энергию на 1 м^2 на орбите Земли, выделенную за сутки всеми вспышками в диапазоне мягкого рентгена. Формула для вычисления XFI представлена в работе Акимова и др. (2003). Частотный индекс Nx представляет собой суточное количество рентгеновских вспышек. Ежедневные и среднемесячные значения XFI и Nx представлены на Веб-сайте «KHASSM» для периода с 01.09.1975 г. по 31.12.2005 г. Таким образом, временные ряды суточных значений индексов XFI и Nx охватывают почти 3 солнечных цикла (данные за 31 год). Они были использованы для сравнения поведения рентгеновских вспышечных индексов с другими солнечными индексами в циклах 21 – 23. Полученные в нашем институте ряды могут использоваться также и для изучения различных геофизических последствий солнечных вспышек, поскольку рентгеновское излучение вспышек ответственно, например, за ионосферные возмущения, приводящие к нарушениям в радиосвязи в коротковолновом диапазоне. На рис. 2.9.10 представлен временной ход среднемесячных индексов XFI и Nx в солнечных циклах 21 – 23.

Как показывает рис. 2.9.10, рентгеновские вспышечные индексы XFI и Nx отражают разные проявления солнечной активности. В то время как по поведению индекса XFI нынешний 23 цикл является самым слабым из 3-х изученных, количество рентгеновских вспышек в нем практически такое же, как и в предыдущем. Акимов и др. (2005) показали, что энергия, выделенная вспышками в рентгеновском диапазоне за 10 лет 23 солнечного цикла, оказалась в 2,6 раза меньшей по сравнению с аналогичным периодом 22 цикла. При одинаковом общем количестве вспышек это означает, что средняя энергия рентгеновских вспышек была в такое же число раз слабее в нынешнем цикле по сравнению с предыдущим. Поведение индекса Nx совпадает с ходом интегрального потока рентгеновского излучения Солнца, который изучили Дмитриев П. Б. и Милецкий Е. В. [16]. Сравнение данных этих авторов с данными Акимова и др. (2005) для Nx показывает, что интегральный поток рентгеновского излучения Солнца в большей степени определяется общим количеством вспышек, а не отдельными мощными вспышками, которые определяют временной ход индекса XFI.

Методами Фурье-анализа Акимов и др. (2005) исследовали квазипериодические изменения ежедневных рентгеновских вспышечных индексов XFI и Nx. Они нашли, что известный ≈ 150 -дневный период имеет статистически значимую амплитуду в нечетных циклах 21 и 23 и практически отсутствует в спектре мощности временных изменений этих индексов в 22

цикле. Авторы обнаружили еще одно отличие между нечетными циклами 21, 23 и циклом 22. В нечетных циклах существует запаздывание выделения энергии во вспышках по отношению к энергии пятнообразования, в 22 цикле такое запаздывание отсутствует. Этот результат существенен с точки зрения баланса между поступлениями магнитной энергии в систему и выделения ее в солнечных вспышках. Он подтверждает теоретические расчеты [17].

Следует отметить также еще одно направление в солнечных исследованиях, начатых в последние годы в НИИ астрономии ХНУ, – обработка материалов, полученных на КА Коронас-Ф. Эти исследования проводятся в научном сотрудничестве с Физическим институтом им. Лебедева РАН и ГАИШ МГУ. Харьковскими солнечниками было создано программное обеспечение для чистки изображений в линии MgXII 8,42 ангстрем от следов космических частиц и случайных помех, устранения неоднородностей фона и т.д. По данным СПИРИТ/КОРОНАС-Ф были проанализированы временные изменения интегральной интенсивности отдельных активных областей на Солнце в этой рентгеновской линии, изображения в которой относятся к самым горячим областям короны. В полученных спектрах мощности обнаружены статистически значимые пики с периодами в интервале 12 – 30 минут и 40 – 200 минут. Показано, что после всплывания нового фотосферного магнитного потока в активной области NOAA 9840 изменился спектр мощности в области этих периодов (Акимов и др., 2005). Работы по данным КА Коронас-Ф в отделе физики Солнца, Луны и планет продолжаются и в настоящее время.

Исследование дневного астроклимата на Чугуевской наблюдательной станции

Оптические и регистрирующие элементы нового спектрогелиографа, о котором речь пойдет в следующем разделе, позволяют получать изображения с разрешением не хуже 1 секунды дуги. Поэтому вполне естественно возникла необходимость широкого исследования дневного астроклимата на загородной станции НИИ астрономии, чтобы максимально реализовать возможности нового инструмента. Надо знать, как часто атмосферное замытие изображений не превышает 1 секунды дуги, в какое время суток надо проводить наблюдения, в какое время года и при каких атмосферных условиях дрожание минимально, каковы требования к павильону и окружающему ландшафту.

Кроме того, исследование турбулентной активности в степной зоне Украины представляет самостоятельный интерес. Наша наблюдательная станция расположена в открытой ровной степи в междуречье Донца и Оскола, на одной территории с известным декаметровым радиотелескопом РИ НАН Украины. Степь ровная, покрыта травой. При хорошей погоде обычно дуют ветры восточного направления (северо-восток, восток, юго-восток), т.е. со стороны радиотелескопа, который расположен на юго-востоке от станции и занимает площадь около 2х2 км.

Область изопланатичности дрожания солнечного края составляет около двух минут дуги, т.е. изображение такого диаметра при дрожаниях перемещается как целое без деформаций. Используя эту информацию и учитывая, что основной размер атмосферных неоднородностей составляет 10 – 20 см, Акимовым Л. А и Акимовым А. Л. (2001) была разработана следующая методика наблюдений. В фокальной плоскости фотосферного телескопа АФР-2, входное отверстие которого задиафрагмировано до 5 см, устанавливается прямоугольная диафрагма размером 20х50 секунд дуги. Край изображения Солнца устанавливается на расстоянии 30 секунд от края диафрагмы. В этом случае, с учетом распределения яркости по диску Солнца (Акимов и др., 2000), смещение края на одну секунду дуги приводит к изменению потока света через диафрагму на 4 процента. Свет, прошедший через диафрагму и зеленый фильтр, поступает на светоприемник (ФЭУ). Сигнал с фотоумножителя накапливается с помощью интегратора на операционном усилителе в течение 10 миллисекунд и затем записывается в память ЭВМ. Частота считывания 50 герц. Одна реализация записи составляет 512 отсчетов (около 10 секунд). Одна серия записи составляет 18 реализаций (около 3 минут). Серии измерений повторяются через полчаса. Предусмотрена возможность записи с частотой 512 гц.

По результатам измерений рассчитывались автокорреляционные функции $K(m) = \frac{\sum [u(n) - s][u(n+m) - s]}{N \cdot s \cdot s}$, где $u(n)$ – величина сигнала, n – номер отсчета, N – полное число отсчетов, s – среднее значение сигнала, суммирование ведется по n от 1 до $N-m$. Значение автокорреляционной функции в нуле пропорционально дисперсии сигнала, а значению $K(0) = 0,0001$ соответствует смещение края Солнца на 0,25 секунды дуги. Путем Фурье-

анализа автокорреляционной функции можно получить спектральную мощность сигнала. Поскольку интервал времени между реализациями составляет 80 миллисекунд, то по всей серии можно исследовать и низкочастотную составляющую сигнала.

С описанной аппаратурой и методикой наблюдения проводились с 1999 года с марта до октября. Наблюдениями охвачено 72 дня при различных состояниях погоды. Построены кривые суточной зависимости среднеквадратичных значений амплитуды дрожаний солнечного края. Проведены уникальные измерения в дни затмений 11 августа 1999 г., 31 мая 2003 г., 5 октября 2005 г. и 29 марта 2006 г.

Анализ результатов наблюдений (рис. 2.9.11) показывает, что в летние дни при антициклональной погоде и при слабых или умеренных ветрах восточного направления среднеквадратичная величина амплитуды дрожания не превышает 0,6 секунды до 10 часов и достигает 0,7 – 0,8 секунды к полудню (кривая 1). При наличии снежного покрова (март 2001 г., март 2003 г.) среднеквадратичные значения амплитуды дрожания составляют около 0,9 секунды дуги и имеют слабую тенденцию уменьшаться с уменьшением зенитного расстояния Солнца (кривая 2). В мартовские и апрельские дни без снежного покрова и с мало развитой растительностью амплитуда дрожания составляет около 1 секунды до 10 часов декретного времени, когда обычно начинают появляться конвективные облака, затем растет к полудню (время киевское) до 1,2 – 1,3 секунды дуги (кривая 3).

Типичный дневной ход среднеквадратичной величины амплитуды дрожания солнечного края в летнее время можно проследить по результатам, полученным в день затмения 11 августа 1999 г. (рис. 2.9.12). Точки – результаты измерений в секундах дуги. Сплошная кривая – относительная освещенность поверхности земли. По оси абсцисс – киевское время. Утром, до начала образования конвективных облаков, амплитуда дрожания достаточно мала, почти не меняется с уменьшением зенитного расстояния Солнца. После того как поверхность достаточно прогреется и прогреет приземный слой атмосферы, начинают подниматься ячейки теплого воздуха, вовлекающие все более толстые слои в конвективные процессы, амплитуда дрожания солнечного края начинает расти с уменьшением зенитного расстояния.

Характерна реакция турбулентной активности атмосферы на «выключение светила», хорошо выраженная 11 августа 1999 г., когда затмение происходило в разгар летнего дня. К моменту максимальной фазы турбулентная активность нижней атмосферы почти полностью прекратилась, амплитуда дрожания солнечного края уменьшилась втрое по сравнению с амплитудой перед началом затмения и достигла значения 0,38 секунды дуги. По этим данным оценено время релаксации турбулентной активности. Оно составляет 16 минут.

Таким образом, для исследуемого периода среднеквадратическая величина амплитуды дрожания солнечного края не превышает 1 секунды дуги в 70 процентах случаев. В летнюю, устойчивую антициклональную погоду амплитуда дрожаний солнечного края не превышает 0,9 секунды, а в утренние и вечерние часы составляет, как правило, 0,5 – 0,6 секунды дуги.

Следует считать, что дневной астроклимат на территории наблюдательной станции НИИ астрономии ХНУ позволяет реализовать высокое пространственное разрешение нового спектрогелиографа и рекомендовать его установку на территории станции.

Разработанная аппаратура и методика измерений амплитуды дрожания небесных объектов может применяться как в полевых, так и в стационарных условиях, а также и при ночных наблюдениях, для чего можно использовать край Луны или расфокусированное изображение ярких звезд.

Харьковский спектрогелиограф для оперативной регистрации солнечной активности

В настоящее время по договору УНТЦ в мастерских ИРЭ НАНУ им. А. Я. Усикова изготавливается новый спектрогелиограф для нашей обсерватории. В разработке концепции инструмента, его конструировании и изготовлении активное участие принимали сотрудники обсерватории Акимов Л. А., Белкина И. Л., Железняк А. П., Коничек В. П., Корохин В. В., Синельников И. Е. Инструмент будет установлен на территории Чугуевской наблюдательной станции.

Основные параметры инструмента следующие:

- 1) Диаметр входного отверстия телескопа 30 см.
- 2) Пространственное разрешение не хуже 1 сек. дуги по всему диску Солнца.
- 3) Размер заштрихованной части дифракционной решетки 18 x 20 см, решетка имеет 600 штрихов на мм.
- 4) Спектральное разрешение в зеленой области спектра не хуже 0,1 ангстрема.
- 5) Две камеры спектрографа позволяют одновременно получить изображение

- Солнца в линии H_{α} водорода и в линии 10830 ангстрем гелия.
- 6) Регистрация спектра осуществляется матрицей светочувствительных диодов, имеющей 2048 x 2048 элементов размером 12 мкм. Информация считывается с любого заданного количества строк, столбцов или площадки.
 - 7) Область светочувствительности от 350 нм до 1200 нм.
 - 8) Поворотом решетки можно на матрицу направить любую область спектра.
 - 9) Скорость регистрации позволяет получать изображение диска Солнца за 1 минуту.
 - 10) Сканирование изображения Солнца на щели спектрографа осуществляется поворотом плоского зеркала, установленного перед объективом телескопа.
 - 11) Цифровая информация от обеих матриц передается на центральный компьютер, где производится оперативная обработка изображений Солнца.
 - 12) Скорость получения изображений сравнима со скоростью получения фильмограмм с интерференционными фильтрами. Однако инструмент позволяет получать одновременно изображения как в центре линии, так и в крыльях, а значит и скорости по лучу зрения, что весьма важно для изучения нестационарных процессов. При изучении быстрых процессов во вспышках изображение активной области размером меньше одной минуты дуги можно получать каждую секунду.

Эксплуатация этого инструмента позволит реализовать ряд интересных оригинальных программ по изучению солнечной активности, автоматизировать процесс наблюдений и обработки результатов наблюдений, выйти на новый мировой уровень в исследованиях Солнца.

Литература

- [1] *Gulyaev R. A.* On the temperature of the helium emission regions in the solar atmosphere // *Solar Phys.* – 1972. – 24, №1. – P. 72-78.
- [2] *Перепелкин Е. И., Мельников О. А.* Изучение эмиссии гелия в линии D3 в спектре хромосферы // *Бюлл. Пулк. Обс.* – 1935. – 14, №122. – С. 1-16.
- [3] *Athay R. G., Menzel D. H.* A Model of the Chromosphere from the Helium and Continuum Emission // *Astrophys. J.* – 1956. – V.123. – P.285-298.
- [4] *White O. R.* A He (D₃) Emission Shell in the Solar Chromosphere // *Astrophys. J.* – 1963. – V. 138. – P.1316-1317.
- [5] *Шкловский И. С.* Ионизация хромосферы и протуберанцев и проблема распределения плотности в хромосфере // *Труды ГАИШ.* – 1951. – Т.20. – С. 5-25.
- [6] *Никольская К. И.* Возбуждение линий гелия в хромосферных спикулах // *Астрон. журн.* -1966. – Т.43, №5. – С.936-941.
- [7] *Сомов Б. В., Козлова Л. М.* О тонкой структуре солнечной хромосферы по наблюдениям ИК-линии HeI // *Астрон. журн.* – 1998. – Т.6. – С. 926-934.
- [8] *Аллен К. У.* Астрофизические величины. – М.: Мир, 1977. – 446с.
- [9] *Брюнелли Б. Е., Намагаладзе А. А.* Физика ионосферы. – М.: Наука, 1988. – 528с.
- [10] *Иванов-Холодный Г. С., Никольский Г. М.* Солнце и ионосфера. – М.: Наука, 1969. – 455 с.
- [11] *Соболев В. М., Вяльшин Г. Ф., Наговицын Ю. А.* Турбулентные скорости и кинетические температуры в хромосфере по материалам полного солнечного затмения 30 июня 1973 г. // *Солн. данные.* – 1980. – №7. – С. 88-93.
- [12] *Unno W.* Turbulent motion in the solar atmosphere / *Astrophys. J.* – 1969. – V.129, N2. – P. 375-387.
- [13] *Landman D. A.* Some spectral plasma diagnostics for prominences and structure in the middle chromosphere // *Astrophys. J.* – 1983. – V.269, N2. – P. 728-742
- [14] *Dunn R. B., Evans I. W. et al.* The chromospheric spectrum at the 1962 eclipse // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* – 1968. – V.15, No 3-9. – P. 275-458.
- [15] *Айманова Г. К., Гуляев Р. А.* Распределение нейтрального натрия и скорость нетепловых движений в нижней хромосфере по затменным наблюдениям резонансного дублета D_{1,2} // *Астрон. журн.* – 1976. – Т. 53, №2. – С.353-360.
- [16] *Дмитриев П. Б., Милецкий Е. В.* Временные вариации рентгеновского индекса солнечной активности: сравнительный анализ и возможности прогнозирования // *Сборник тезисов докладов Всероссийской конференции «Многоволновые исследования Солнца и современные проблемы солнечной активности».* – 2006. – CAO РАН, Н.Архыз. – С.19.
- [17] *Wheatland M., Litvinenko Y.* Energy balance in the flaring solar corona // *Astrophys. J.* –

2001. – V.557. – P. 332-336.